第41卷 第2期
2024年2月

干 旱 区 研 究
ARID ZONE RESEARCH

Vol. 41 No. 2
Feb. 2024

基于地形梯度的青藏高原冰川分布格局及成因

许 宁[1]， 李治国[1]， 梁雪悦[2]， 周晓莹[1]

（1. 河南省黄河故道生态保护与治理工程技术研究中心暨河南省绿色科技创新示范基地，商丘师范学院，河南 商丘 476000；2. 河南大学地理与环境学院，河南 开封 475004）

摘 要：目前，冰川分布与变化的影响机理还存在不确定机制。为探究地形因子对冰川分布格局的影响，本文以第6版Randolph冰川编目数据和NASADEM为数据源，运用均值变点法、分布指数和地理探测器等方法，对青藏高原冰川在地形起伏度、海拔、坡度和坡向等地形梯度上的分布格局及其与地形因子之间的响应关系进行分析。结果表明：(1) 青藏高原冰川对坡向、坡度的适宜性较广，对地形起伏度、海拔的选择性较强，且在高地形起伏度、高海拔上呈现优势分布。(2) 地形对冰川发育影响较大，各地形因子对冰川空间分布的影响显著不同。海拔和地形起伏度是控制冰川分布的主要因素，且交互探测结果表明二者共同作用对冰川空间分异性影响最大。(3) 在海拔和地形起伏度梯度上，喜马拉雅山脉冰川优势分布范围最广，其次是喀喇昆仑山脉，其余10座山脉冰川的优势分布均呈近似正态分布，但不同山脉形态各异。

关键词：冰川分布；地形梯度；分布指数；地理探测器；青藏高原

冰川是冰冻圈的重要组成部分，与地表能量平衡、海平面上升、区域气候和水循环等有着密切联系[1]，冰川的存在有助于稳定气候，改善水资源，保护生态系统和地质形态等。青藏高原是世界海拔最高、面积最大的内陆高原，其独特的地势高、气温低且昼夜温差大的条件非常有利于冰川发育，作为中低纬度现代冰川的作用中心，也是亚洲乃至北半球环境变化的调控器[2-4]。

冰川的形成与发育取决于地形条件和降水、气温等气候条件的组合[5-6]。冰川的分布与变化目前还存在不确定的机制。大多数研究将亚洲高山地区的冰川物质平衡归因于气候变化[4-8]，而忽视了其复杂地形的影响[9]。然而，由于区域气候与地形的差异，冰川分布与变化具有显著的区域差异性。深入分析这种复杂地形的影响对于理解冰川分布与变化的空间分异至关重要[9-10]。张正勇等[10]通过构建冰川-地形-气候遥感反演模型，对新疆玛纳斯河流域的冰川分布格局对地理因子响应机制进行研究，发现地形因子对冰川的发育和积累具有决定性作用；张鲜鹤等[11]利用第二次冰川编目数据，研究了中国西部各个山脉冰川面积在海拔梯度上的分布特征、冰川平衡线高度场的分布规律和积累区比率的分布特征；周远刚等[12]研究发现，高程、坡度和坡向对冰川和积雪面积变化的影响较显著；黄丹妮等[13]对东帕米尔高原冰川运动特征进行分析，发现冰川运动速度与冰川规模、坡度、坡向、表碛均相关；张廉卿等[14]研究念青唐古拉山西段小冰期以来冰川变化，发现冰川的面积、坡度和高程对冰川面积变化的解释率为71%；李林凤等[15]运用地理探测器对石羊河流域冰川变化与地形因子之间的关系进行研究，得到海拔是冰川变化空间分异最重要的控制因素。综上所述，前人的研究考虑的地形因子多为海拔、坡度和坡向。山体海拔越高，气温越低，冷储越大，加之其对水汽的拦截，更有利于冰川的发育，往往能发育规模较大的冰川[5,10-11]；缓坡有利于冰川的累积和稳定，从而可形成面积更大的单条冰川[10,13]。在其他条件相同的情况下，阴坡接受太阳辐射热量少，冰川消融速率较低，更适于冰川发

收稿日期：2023-06-09； 修订日期：2023-11-06

基金项目：国家自然科学基金项目(41671072)；商丘师范学院博士人才引进项目(50018401)；商丘市科技创新领军人才项目(SQRC202212005)；商丘师范学院黄河故道生态保护和高质量发展项目(2021KYFZ06)

作者简介：许宁(1987-)，男，博士，讲师，主要从事生态环境遥感与GIS应用研究. E-mail: sqnugis@126.com

通讯作者：李治国. E-mail: lizhiguo999999@163.com

育[10,14]。而地形起伏度(Relief Degree of Land Surface, RDLS)作为地貌类型划分的重要依据,对评价区域人居环境适宜性与资源环境承载力也极其关键[16],目前,鲜有地形起伏度与冰川分布与变化关系的研究。此外,之前的研究大多利用常规统计回归方法研究冰川分布、变化与地形因子之间关系,但该方法存在因数据原因导致解释力不足的劣势[15]。而擅于探测空间分异性、揭示驱动力的新统计方法——地理探测器,同时具有可以探测不同数据类型以及探测两因子交互作用于因变量的优势[17]。

本文以青藏高原为研究区,以第6版Randolph冰川编目资料和NASADEM为数据源,除考虑海拔、坡度和坡向等地形因子外,引入地形起伏度因子,并借助分布指数和地理探测器技术对青藏高原冰川在地形起伏度、海拔、坡度、坡向等地形因子梯度上的分布格局及其对地形因子的响应机制进行探究,以期为区域水文研究提供数据支撑和理论参考。

1　研究区与数据源

1.1　研究区概况

青藏高原边界依据Zhang等[18]青藏高原界线,南自喜马拉雅山脉南麓,北至帕米尔高原北缘、西昆仑山和祁连山山脉北麓,西起兴都库什山脉和帕米尔高原西缘,东抵祁连山、横断山等山脉东缘,总面积为308.34×10⁴ km²(图1)。青藏高原平均海拔约4320 m,地势西高东低,边缘山脉起伏程度较大,内部柴达木盆地与羌塘高原起伏程度较小。青藏高原是中低纬度现代冰川的作用中心,被誉为"亚洲水塔",且青藏高原的冰川大都处于高海拔低纬度地区,其对于气候变化尤为敏感[1]。

1.2　数据来源

本文使用的冰川数据为第6版Randolph冰川编目(RGI 6.0)数据[19],来源于美国国家雪冰数据中心(http://www.glims.org/RGI/)。该数据与之前版本相比,提升了有明确时间信息的冰川占比,吸纳了区域性冰川编目,细化了冰川区范围的界定[20]。根据RGI 6.0的数据,青藏高原地区冰川共77325条,总面积8.3×10^4 km²。本研究主要依据第6版Randolph冰川编目数据和第二次中国冰川编目[21],将青藏高原地区所有冰川划分为12个山地冰川,其中,喀喇昆仑冰川的划分还参考了Mölg等[22]的研究。NASADEM数据来源于美国国家航空航天局(https://earthdata.nasa.gov/),该数据是SRTM数据的升级版,空间分辨率为30 m[23]。基于NASADEM,利用ArcGIS软件提取了青藏高原地形起伏度、海拔、坡度、坡向4个地形因子。

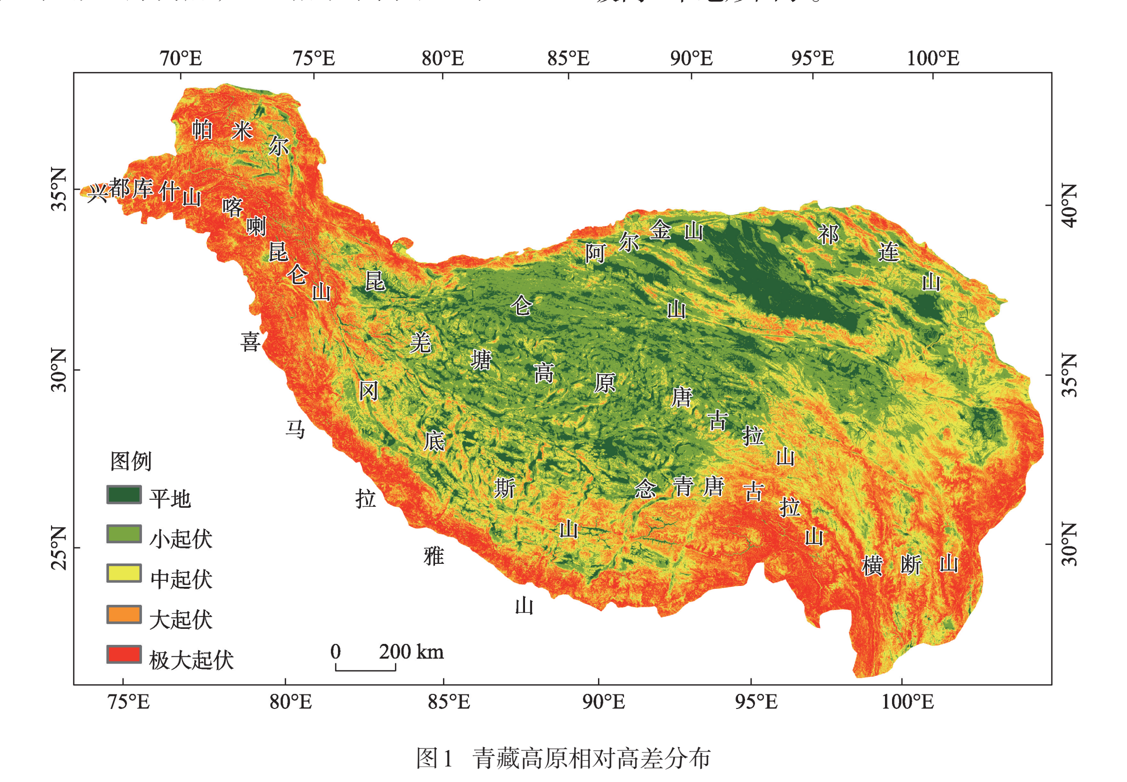


图1　青藏高原相对高差分布

Fig. 1　Distribution map of relative elevation difference of Tibetan Plateau

2 研究方法

2.1 地形起伏度的计算

地形起伏度[16,24]表征高程起伏状况，其计算存在尺度依赖性，关键是确定最佳分析窗口。地形起伏度的计算公式如下：

$$RDLS = ALT/1000 + \{[\mathrm{Max}(H) - \mathrm{Min}(H)] \times [1 - P(A)/A]\}/500 \quad (1)$$

式中：$RDLS$为地形起伏度；ALT、$\mathrm{Max}(H)$、$\mathrm{Min}(H)$、$P(A)$分别为以某一栅格单元为中心的最佳分析窗口下平均海拔(m)、最高海拔(m)、最低海拔(m)和平地(相对高差<30 m的区域)面积(km^2)；A为区域总面积(km^2)。

本文采用均值变点法来确定最佳分析窗口[16,24]。首先，利用ArcGIS软件统计分析窗口(2×2，3×3，…，121×121)下的平均高差，再依次计算单位地势度T，公式如下：

$$T_k = t_k / s_k, \quad (k = 2, 3, \cdots, 120) \quad (2)$$

式中：T_k为第k个分析窗口下单位地势度；t_k为平均高差；s_k为分析窗口面积。对数列T取对数($\ln T$)，得到非线性数列样本X_i(i=2，3，…，120)；并将X_i分为前后两段，即X_2，X_3，…，X_i和X_{i+1}，X_{60}，…，X_{120}，分别计算总样本的离差平方(S)与前后两段样本的离差平方和(S_i)。二者之差的最大值($S-S_i$)对应的分析窗口即为最佳分析窗口。基于NASADEM数据运用均值变点法计算青藏高原地形起伏度最佳分析窗口为36×36个像元的矩形邻域，对应面积约为1.17 km^2(图2)。

2.2 分布指数

标准化、无量纲的分布指数[25]可消除不同地形因子分级、山脉冰川面积差异的影响，能准确、客观揭示青藏高原不同山脉冰川在各地形因子上的实际分布情况与标准分布的偏差，其计算公式如下：

$$P = (S_{ie}/S_i) \times (S/S_e) \quad (3)$$

式中：P代表分布指数；e代表地形因子；S_{ie}代表在e地形因子特定等级下的i座山冰川面积；S_i代表i座山冰川总面积；S为整个研究区的面积；S_e为整个区域e地形因子特定等级下的总面积。分布指数的大小对于冰川在地形上的空间分布有着一定的指示意义：P>1时，表示冰川的分布呈现优势分布，说明该地形带的条件适宜冰川的生存或发育；P<1时，呈现劣势分布，说明该地形级别不适宜冰川生存或发育。优势度随着P值增大而提高，反之则劣势度加剧。另外，若冰川分布曲线比较平缓，起伏不大，表明冰川的分布与标准分布偏离较小，对地形差异的适宜性较广；若曲线起伏较大，则表明冰川对地形具有较强选择性，在其优势地形分级上发育较多。

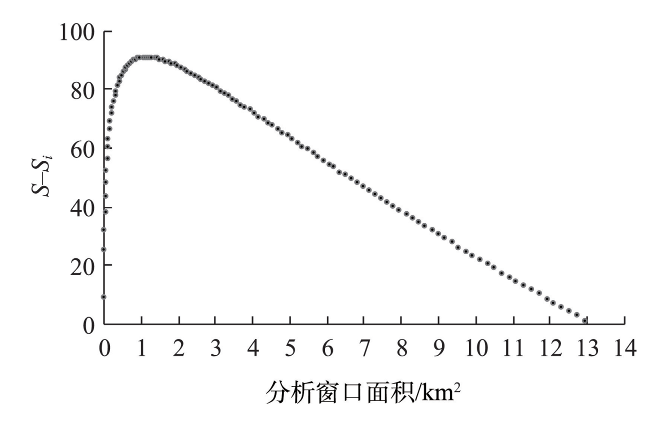


图2 不同窗口面积下$S-S_i$变化范围散点图

Fig. 2 Scatter plot of $S-S_i$ variation range under different window areas

2.3 地理探测器

地理探测器是探测空间分异性，以及揭示其背后驱动因子的一种新的统计学方法，其因子探测q统计量可以度量空间分异性、探测解释因子[17]，其公式如下：

$$q = 1 - \frac{\sum_{h=1}^{L} N_h \sigma_h^2}{N\sigma^2} \quad (4)$$

式中：h=1，…，L为自变量或因变量的分层；N_h和N分别为层h和全区的单元数；σ_h^2和σ^2为自变量驱动因子和因变量冰川分布的方差。q的值域为[0,1]，值越大表示驱动因子对冰川分布的解释力越强，反之则越弱。极端情况下，q值为1表明驱动因子完全控制了冰川空间分布，q值为0表明二者之间没有任何关系。

3 结果与分析

3.1 基于地形梯度的青藏高原冰川分布格局

为探究冰川在各地形因子上的分布特征，将青藏高原地形起伏度(0.3989~11.5973)、海拔(297~8781 m)和坡度(0°~86.3963°)按自然断点法分为9级，将坡向按无坡向、北坡、东北坡、东坡、东南坡、南坡、西南坡、西坡、西北坡分为9级，然后分别计算青藏高原冰川在地形起伏度、海拔、坡向、坡度的分布指数(图3)。由图3可知，青藏高原冰川在地形起伏度、海拔上的分布曲线起伏较大，且随着地形起

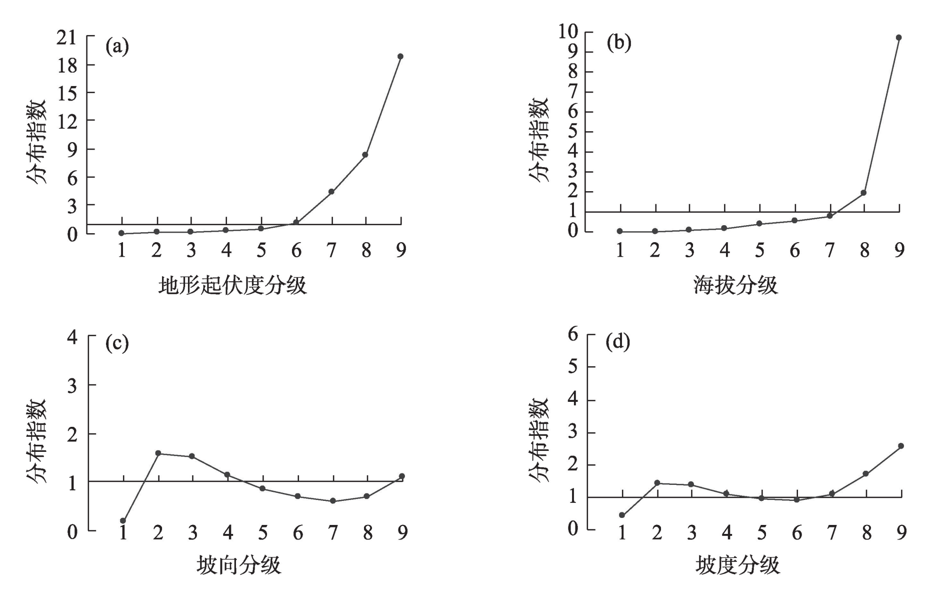


图3 各地形因子冰川的分布特征

Fig. 3 The distribution characteristics of glaciers with different topographic factors

伏度、海拔的升高,青藏高原冰川的分布指数呈现递增的趋势,并在地形起伏度第6~9分级(5.0795~11.5973)、海拔第8~9分级(5082~8781 m)上呈现优势分布,说明冰川对地形起伏度、海拔具有较强选择性;青藏高原冰川在坡向、坡度上的分布曲线比较平缓,起伏不大,表明冰川对坡向、坡度的适宜性较广。冰川在北坡、东北坡、东坡和西北坡上呈现优势分布,其中,北坡分布指数最高,其次是东北坡;另外,冰川在坡度第2~7分级(5.0623°~36.1110°)上的曲线特别平缓,集中在标准1的附近、在7~9分级(36.1110°~86.3963°)上,随着坡度变陡,分布指数呈现递增的趋势。

3.2 地形对冰川分布影响的定量分析

地理探测器因子探测可以明确地形因子对冰川分布空间分异的影响程度。利用ArcGIS软件,生成覆盖青藏高原全区的2 km×2 km的采样网格,并选取距离青藏高原冰川5 km范围内的网格,共计179736个。然后,计算每个网格冰川的面积分布百分比,以其作为因变量Y,并将其赋给网格的中心点。将海拔、地形起伏度、坡度、坡向4个地形因子作为自变量X,借助地理探测器技术计算的因子探测及交互探测结果见表1。

表1 地形因子对冰川分布的影响

Tab. 1 Influence of topographic factors on glacier distribution

	因子探测q值				交互探测					
	海拔	地形起伏度	坡度	坡向	海拔∩坡向	海拔∩坡度	坡向∩坡度	海拔∩地形起伏度	坡向∩地形起伏度	海拔∩地形起伏度
阿尔金山	0.5901	0.3296	0.0158	0.0172	0.6651	0.6258	0.1082	0.6221	0.4106	0.4834
祁连山	0.5205	0.2006	0.0046	0.0123	0.5480	0.5359	0.0343	0.5596	0.2277	0.2792
唐古拉山	0.4717	0.2658	0.0017	0.0028	0.4794	0.5236	0.0162	0.6128	0.2770	0.4488
昆仑山	0.4346	0.2242	0.0128	0.0070	0.4498	0.4756	0.0252	0.4610	0.2397	0.4007
兴都库什山	0.3885	0.2045	0.0454	0.0108	0.4077	0.4451	0.0657	0.4326	0.2216	0.2951
帕米尔	0.3445	0.2319	0.0279	0.0105	0.3632	0.3920	0.0448	0.3815	0.2496	0.3109
横断山	0.2400	0.1328	0.0152	0.0056	0.2507	0.2631	0.0342	0.2829	0.1511	0.1865
羌塘高原	0.1851	0.2220	0.0093	0.0044	0.1920	0.2568	0.0237	0.2428	0.2325	0.3218
喜马拉雅山	0.1720	0.1256	0.0422	0.0039	0.1768	0.2115	0.0485	0.2150	0.1330	0.1979
喀喇昆仑山	0.1593	0.1508	0.0475	0.0053	0.1668	0.2475	0.0564	0.2493	0.1612	0.2520
念青唐古拉山	0.1201	0.0915	0.0202	0.0028	0.1258	0.1556	0.0290	0.1733	0.0989	0.1357
冈底斯山	0.0673	0.0992	0.0119	0.0019	0.0698	0.0811	0.0286	0.1170	0.1082	0.1213

由表1可知,各山脉冰川的海拔、地形起伏度的q值远高于坡度和坡向。且除羌塘高原、冈底斯山外,其余山脉冰川的q值均呈现出海拔>地形起伏度的特征。另外,坡度和坡向的q值均很小,说明坡度和坡向对冰川空间分布的影响力明显偏弱。可见,海拔和地形起伏度是控制青藏高原各山脉冰川空间分布的主导因素。

交互探测结果表明,各地形因子对冰川分布格局的影响并不独立,任意两个地形因子交互作用均高于单因子作用,均呈现双因子增强和非线性增强,不存在独立及减弱的关系。这也说明本文选取的4个影响因子中任意两个因子的交互作用对青藏高原冰川分布格局的影响更为显著。海拔和地形起伏度的共同作用对冰川分布的影响最大。虽然,坡度和坡向的单因子q值都较低,但与其他因子交互后均超过单因子单独作用对冰川分布格局的影响,因此,这些因子的影响也不可忽视。

另外,同一地形因子或地形因子组合对各山脉冰川分布空间分异的解释力强弱存在明显的差异。其中,海拔对阿尔金山、祁连山、唐古拉山、昆仑山、兴都库什山等冰川空间格局分异的解释力较强,q值均超过0.3;而对横断山、羌塘高原、喜马拉雅山、喀喇昆仑山、念青唐古拉山等冰川空间格局分异的解释力较弱,对冈底斯山冰川空间格局分异的解释力最弱,q值仅为0.0673,且冈底斯山的冰川分布受各地形因子及其组合的影响均较小,数值均小于0.12。

3.3 地形起伏度、海拔梯度上各山脉冰川分布特征

为了进一步探究青藏高原各山脉冰川在地形起伏度、海拔梯度上的分布特征,将地形起伏度、海拔按等距法分为50级,运用分布指数,分别计算青藏高原各山脉冰川在地形起伏度、海拔梯度上的分布指数(图4,图5)。

由图4可知,各山脉冰川在地形起伏度梯度上

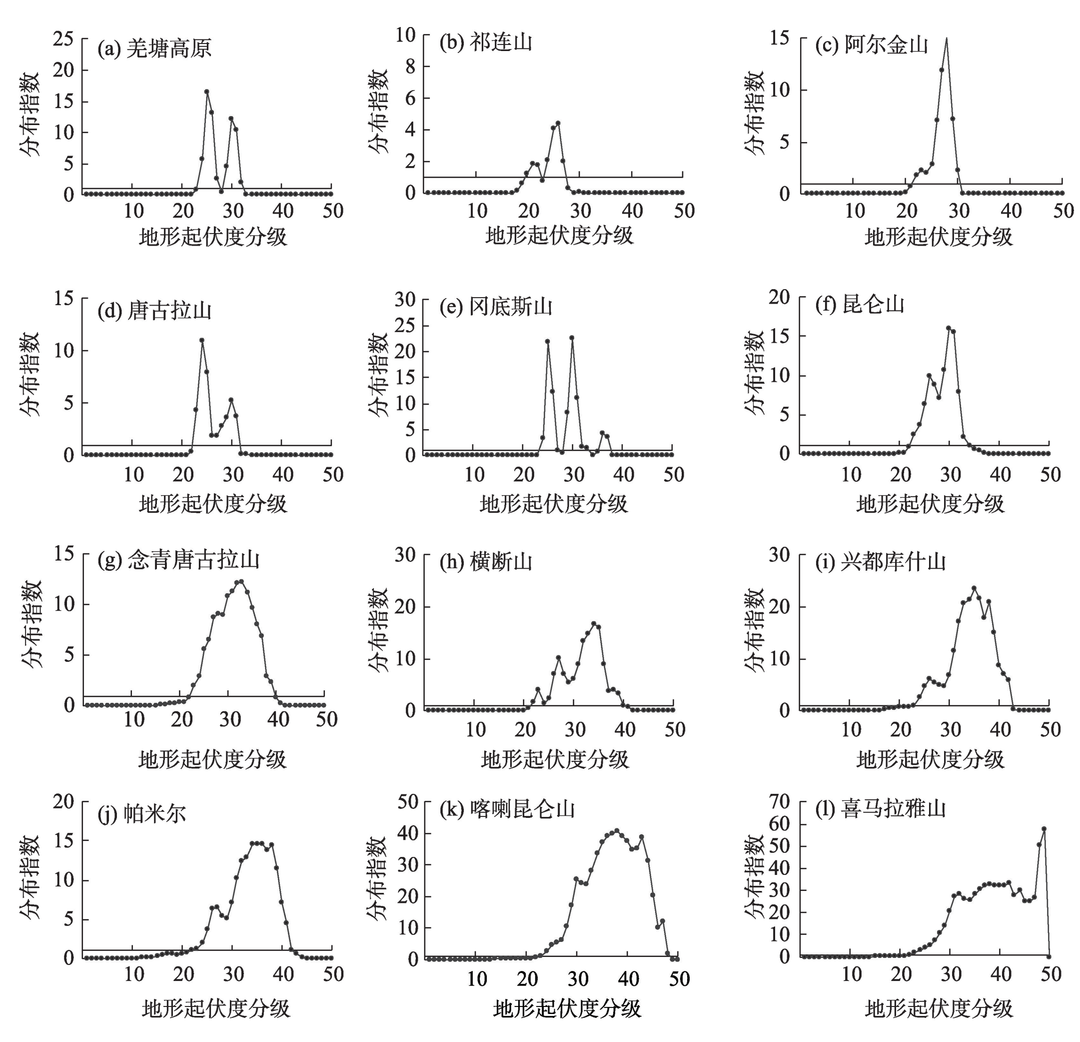


图4 各山脉冰川在地形起伏度梯度上的分布

Fig. 4 Distribution map of mountain glaciers based on *RDLS*

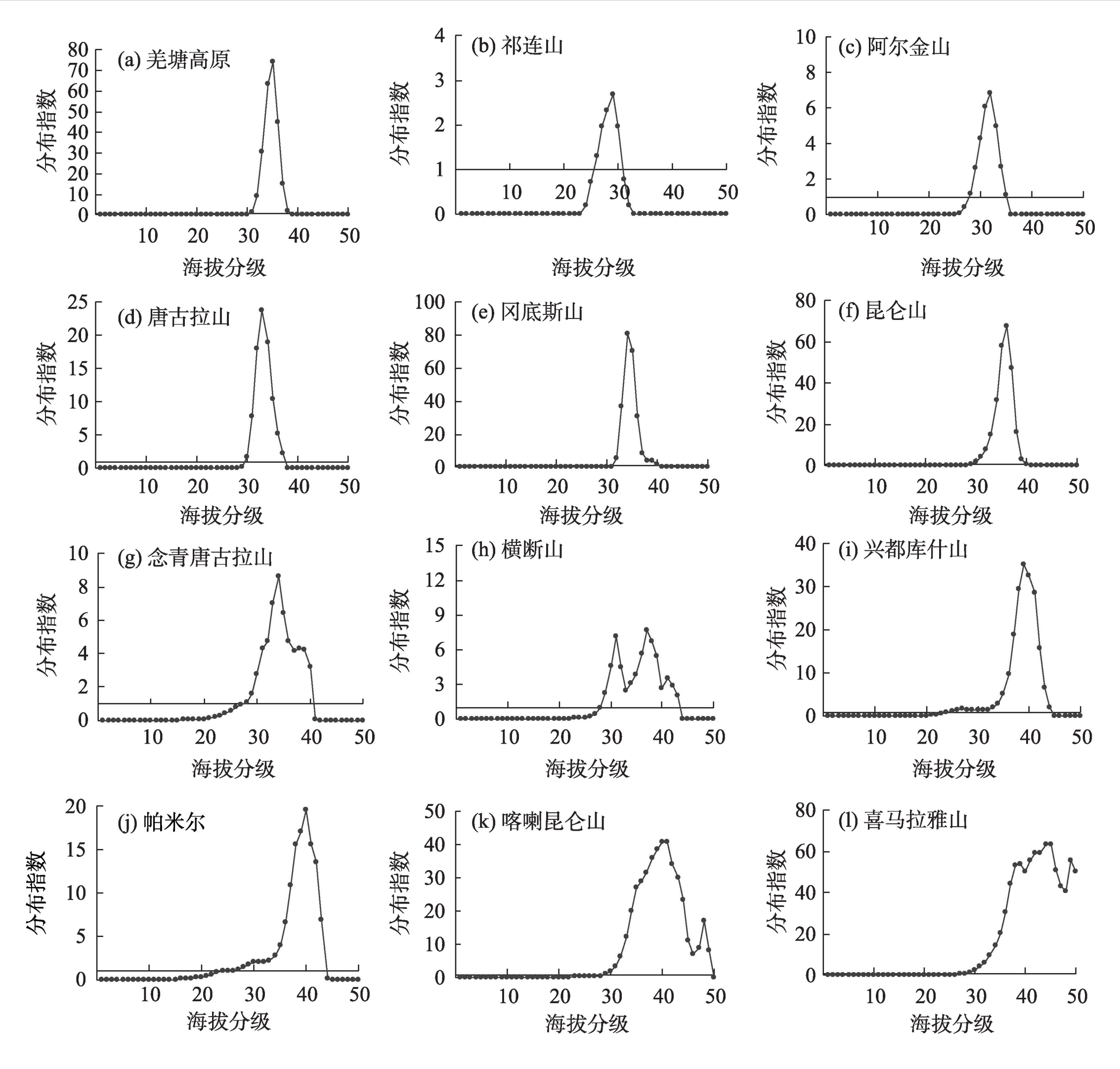


图5　各山脉冰川在海拔梯度上的分布

Fig. 5　The distribution of glaciers in each mountain range on the elevation gradient

呈现出各异的形态。喜马拉雅山、喀喇昆仑山、帕米尔等冰川优势分布范围在20个区间以上,且在优势分布区间分布指数值整体较高。其中,喜马拉雅山脉冰川优势分布范围最广,为23~49区间(5.3262~11.3733),且在该范围分布指数随着地形起伏度增加总体呈增长趋势。喀喇昆仑山脉冰川优势分布范围次之,为23~48区间(5.3262~11.1494),且随着地形起伏度的增加,分布指数呈现先增长后骤降的趋势。兴都库什山、横断山、念青唐古拉山的冰川优势分布区间在17~20个区间,分布指数随地形梯度的形态呈现扁平型;昆仑山、冈底斯山、唐古拉山、阿尔金山、祁连山、羌塘高原的冰川优势分布区间在10个区间以内,均呈现瘦高型,且多为双峰、多峰的形态,其中,羌塘高原冰川优势分布区间最窄。

由图5可知,各山脉冰川面积在海拔梯度上的分布格局差异显著,且形态各异。喜马拉雅山脉冰川优势分布范围最广,为29~50区间(5048~8781 m),且随着海拔的升高,呈现急剧增加,后趋于平稳的趋势。喀喇昆仑山脉冰川优势分布区间较广,为29~49区间(5048~8611 m),在30~40区间呈现剧增的趋势,随后呈现递减趋势。其余10座山脉冰川的优势分布均呈近似正态分布。兴都库什山、帕米尔高原和横断山,优势分布区间分别为25~44区间(4369~7763 m)、27~43区间(4709~7593 m)和29~43区间(5048~7593 m);念青唐古拉山、昆仑山、冈底斯山、唐古拉山、阿尔金山、羌塘高原、祁连山的冰川优势分布区间数目在15个区间以内,分布指数曲线呈现瘦高型正态分布。其中,祁连山冰川优势分布区间最窄,优势分布区间数目仅为5个区间。

4 讨 论

青藏高原冰川的分布格局与地形因子之间的关系一直是地理学和冰川学研究的重要议题。本研究发现,青藏高原冰川对坡向、坡度的适宜性较广,对地形起伏度、海拔的选择性较强,且在高地形起伏度、高海拔上呈现优势分布。地理探测器因子探测结果也表明,在所选的4个地形因子中,海拔和地形起伏度是控制冰川分布的主要因素,且交互探测结果表明二者共同作用对冰川空间分异性影响最大。这与前人的研究结论[14-15]相一致。但同一地形因子或地形因子组合对各山脉冰川分布空间分异的解释力强弱存在明显的差异,这可能与各山脉独特的区域位置与气候条件有关。青藏高原冰川分布受到多种气象因素的影响,其中温度和降水是决定冰川发育的物质基础[10,26]。这些气象因素与地形因子共同作用,决定了冰川的形成、发育和退缩。青藏高原冰川主要受西南季风、东南季风、南亚季风等季风环流和西风环流及其相互作用的影响[11]。各山脉外侧迎风坡降水丰富,有利于冰川发育,又因高大山体遮挡作用,背风坡降水较少。青藏高原亚洲夏季风气候态北界沿着祁连山东段-唐古拉山-羌塘高原-冈底斯山-西喜马拉雅山分布[27]。该界线以北为西风影响区,降水稀少,气候干冷,地形因子对该区较多山脉冰川分布空间分异的解释力较强;该界线以南为季风影响区,降水较多,气候湿润,地形因子对该区较多山脉冰川分布空间分异的解释力较弱;而受两个环流系统共同影响的西风-季风过渡区则更为复杂。其中,冈底斯山-念青唐古拉山又为青藏高原年均温0 ℃和最冷月均温-10 ℃的分界线,其南北两侧的水热状况差异显著,南侧气候较北部温暖湿润,且温度差异呈现“跃变”特征[28],从而决定了该界线两侧冰川分布格局的差异。其独特的气候特征可能是导致地形因子对冈底斯山-念青唐古拉山冰川分布空间分异的解释力最弱的原因。

地形和气候共同作用是导致不同山脉冰川在地形梯度上分布格局差异的原因。此外,青藏高原各山脉冰川在地形梯度上的分布多呈现近似正态分布特征,即在某一个地形带上分布指数出现峰值,表征该地形带的气候或地形最适宜冰川的生存和发展。而不同山脉冰川在地形梯度上的分布格局存在明显差异,峰值的高度不同,且优势分布的范围也不同,进而呈现出各异的形态特征。较低纬度地区的山脉冰川,如喜马拉雅山、念青唐古拉山、喀喇昆仑山,因所处区域热量充足、温度高的原因,冰川只能在海拔较高的范围存在,另外,降水相对较多,保障了冰川向较低海拔延伸,故冰川优势分布区间较广;冈底斯山、羌塘高原、昆仑山的冰川类型多为极大陆型冰川,所处区域降水稀少,冰川赖以生存的物质条件相对缺乏,冰川延展范围较小,故分布海拔相对集中,分布特征呈现瘦高型[11]。另外,因其冰川厚度大,受地形起伏的影响相对较弱,导致呈现多峰的状态;念青唐古拉山东段、横断山脉冰川属于海洋型冰川,地处中国第一、二阶梯的过渡带,位于东南和西南两大季风交汇区,受区域大气环流及地形因素综合影响,降水充沛,冰川得以向较低海拔延伸,故冰川优势分布区间较广。又因地形复杂、地域差异性强,导致呈现多峰的状态。

综上所述,地形因子对冰川分布的指示能力是显而易见的,但在某些特定的区域,这种指示能力可能会受到气温、降水、风向、区位等因素的影响。本文仅探究了青藏高原冰川面积在各地形梯度上的分布格局,为了深入研究基于地形梯度的冰川分布格局,还应开展对冰川体积、厚度、长度、平衡线等方面的研究。又因缺乏青藏高原地区气象观测数据,对青藏高原冰川影响成因的分析尚不充分。在未来的研究中,需耦合不同尺度冰川的分布格局和时空变化规律,综合考虑气象、地形、人文等多种影响因素,建立冰川系统模型,以模拟预测冰川的变化趋势,并定量评估冰川变化对全球气候与环境变化的影响。

5 结 论

本文基于第6版Randolph冰川编目和NASA-DEM数据,采用均值变点法确定了青藏高原地区地形起伏度的最佳计算窗口,并利用分布指数和地理探测器技术,分析了青藏高原各山脉冰川在地形起伏度、海拔、坡向、坡度上的分布格局及其成因。主要结论如下:

(1) 青藏高原冰川对坡向、坡度的适宜性较广,对地形起伏度、海拔的选择性较强,且在高地形起伏度、高海拔上呈现优势分布。随着地形起伏度、

海拔的升高,青藏高原冰川的分布指数呈现递增的趋势,且在地形起伏度第6~9、海拔第8~9分级上呈现优势分布;青藏高原冰川在北坡、东北坡、东坡和西北坡上呈现优势分布,其中,北坡分布指数最高,其次是东北坡;青藏高原冰川对坡度的适宜性最广,在坡度第2~7分级分布指数集中在标准1的附近,在7~9分级上,随着坡度变陡,分布指数呈现递增的趋势。

(2)地形对冰川的发育影响较大,各地形因子对冰川空间分布的影响显著不同,海拔和地形起伏度是控制冰川分布的主要因素,其次是坡度和坡向。交互探测结果表明,海拔、坡度、坡向和地形起伏度对冰川分布格局的影响并不独立,任意两个地形因子对冰川分布的交互作用高于单因子作用,均呈现双因子增强和非线性增强,不存在独立及减弱的关系。海拔和地形起伏度的共同作用对冰川空间分异性影响最大。

(3)在地形起伏度分级上,喜马拉雅山、喀喇昆仑山、帕米尔高原的冰川优势分布范围在20个区间以上,且在优势分布区间分布指数值整体较高。其中,喜马拉雅山脉冰川优势分布范围最广。在海拔分级上,喜马拉雅山脉冰川优势分布范围最广,且随着海拔升高呈现急剧增加,后趋于平稳的趋势。喀喇昆仑山脉冰川优势分布区间较广,呈现先剧增后递减的趋势。其余10座山脉冰川的优势分布均呈近似正态分布,但不同山脉的形态差异显著。

参考文献(References):

[1] 刘时银, 姚晓军, 郭万钦, 等. 基于第二次冰川编目的中国冰川现状[J]. 地理学报, 2015, 70(1): 3-16. [Liu Shiyin, Yao Xiaojun, Guo Wanqin, et al. The contemporary glaciers in China based on the Second Chinese Glacier Inventory[J]. Acta Geographica Sinica, 2015, 70(1): 3-16.]

[2] 姚檀栋, 陈发虎, 崔鹏, 等. 从青藏高原到第三极和泛第三极[J]. 中国科学院院刊, 2017, 32(9): 924-931. [Yao Tandong, Chen Fahu, Cui Peng, et al. From Tibetan Plateau to Third Pole and Pan-Third Pole[J]. China Academic Journal Electronic Publishing House, 2017, 32(9): 924-931.]

[3] Yao T D, Wu F Y, Ding L, et al. Multispherical interactions and their effects on the Tibetan Plateau's earth system: A review of the recent researches[J]. National Science Review, 2015, 2(4): 468-488.

[4] 冀琴, 董军, 刘睿, 等. 1990—2015年喜马拉雅山冰川变化的遥感监测及动因分析[J]. 地理科学, 2020, 40(3): 486-496. [Ji Qin, Dong Jun, Liu Rui, et al. Glacier changes in response to climate change in the Himalayas in 1990-2015[J]. Scientia Geographica Sinica, 2020, 40(3): 486-496.]

[5] 施雅风. 中国冰川与环境: 现在、过去和未来[M]. 北京: 科学出版社, 2000. [Shi Yafeng. Glaciers and Their Environments in China: The Present, Past and Future[M]. Beijing: Science Press, 2000.]

[6] 孙永, 易朝路, 刘金花, 等. 昆仑山木孜塔格地区冰川发育水汽来源探讨[J]. 地球环境学报, 2018, 9(4): 383-391. [Sun Yong, Yi Chaolu, Liu Jinhua, et al. Discussing sources of moisture feeding the glaciers on the Ulugh Muztagh, Kunlun Mountain[J]. Journal of Earth Environment, 2018, 9(4): 383-391.]

[7] 吴坤鹏, 刘时银, 郭万钦. 1980—2015年南迦巴瓦峰地区冰川变化及其对气候变化的响应[J]. 冰川冻土, 2020, 42(4): 1115-1125. [Wu Kunpeng, Liu Shiyin, Guo Wanqin. Glacier variation and its response to climate change in the Mount Namjagbarwa from 1980 to 2015[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2020, 42(4): 1115-1125.]

[8] 王盛, 姚檀栋, 蒲健辰. 祁连山七一冰川物质平衡的时空变化特征[J]. 自然资源学报, 2020, 35(2): 399-412. [Wang Sheng, Yao Tandong, Pu Jianchen. Spatial and temporal variations in mass balance of Qiyi Glacier in Qilian Mountains[J]. Journal of Natural Resources, 2020, 35(2): 399-412.]

[9] Wang R J, Ding Y J, Shangguan D H, et al. Influence of topographic shading on the mass balance of the high mountain Asia glaciers [J]. Remote Sensing, 2022, 14(7): 1576.

[10] 张正勇, 刘琳, 徐丽萍. 冰川分布格局对地理因子响应机制[J]. 生态环境学报, 2018, 27(2): 290-296. [Zhang Zhengyong, Liu Lin, Xu Liping. Response mechanism of glacial distribution patterns to geographical factors[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2018, 27(2): 290-296.]

[11] 张鲜鹤, 王欣, 刘时银, 等. 基于第二次冰川编目数据的中国冰川高度结构特征分析[J]. 地理学报, 2017, 72(3): 397-406. [Zhang Xianhe, Wang Xin, Liu Shiyin, et al. Altitude structure characteristics of the glaciers in China based on the Second Chinese Glacier Inventory[J]. Acta Geographica Sinica, 2017, 72(3): 397-406.]

[12] 周远刚, 赵锐锋, 张丽华, 等. 博格达峰地区冰川和积雪变化遥感监测及影响因素分析[J]. 干旱区地理, 2019, 42(6): 169-177. [Zhou Yuangang, Zhao Ruifeng, Zhang Lihua, et al. Remote sensing monitoring of the change of glacier and snow cover and its influencing factors in Mount Bogda[J]. Arid Land Geography, 2019, 42(6): 169-177.]

[13] 黄丹妮, 张震, 张莎莎, 等. 东帕米尔高原冰川运动特征分析[J]. 干旱区地理, 2021, 44(1): 131-140. [Huang Danni, Zhang Zhen, Zhang Shasha, et al. Characteristics of glacier movement in the eastern Pamir Plateau[J]. Arid Land Geography, 2021, 44(1): 131-140.]

[14] 张廉卿, 许向科, 张骞, 等. 念青唐古拉山西段小冰期以来冰川变化[J]. 地球环境学报, 2019, 10(6): 567-578. [Zhang Lianqin, Xu Xiangke, Zhang Qian, et al. Glacier change in the western

Nyainqentanglha Range, southern Tibet, since the Little Ice Age [J]. Journal of Earth Environment, 2019, 10(6): 567−578.]

[15] 李林凤, 李开明. 石羊河流域冰川变化与地形因子的关系探究[J]. 冰川冻土, 2019, 41(5): 1026−1035. [Li Linfeng, Li Kaiming. Study on the relationship between glacier change and topographic factors in the Shiyang River Basin[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2019, 41(5): 1026−1035.]

[16] 封志明, 李文君, 李鹏, 等. 青藏高原地形起伏度及其地理意义[J]. 地理学报, 2020, 75(7): 1359−1372. [Feng Zhiming, Li Wenjun, Li Peng, et al. Relief degree of land surface and its geographical meanings in the Qinghai-Tibet Plateau, China[J]. Acta Geographica Sinica, 2020, 75(7): 1359−1372.]

[17] 王劲峰, 徐成东. 地理探测器:原理与展望[J]. 地理学报, 2017, 72(1): 116−134. [Wang Jinfeng, Xu Chengdong. Geodetector: Principle and prospective[J]. Acta Geographica Sinica, 2017, 72(1): 116−134.]

[18] Zhang G Q, Yao T D, Xie H J, et al. Increased mass over the Tibetan Plateau: From lakes or glaciers?[J]. Geophysical Research Letters, 2013, 40(10): 2125−2130.

[19] RGI Consortium. Randolph Glacier Inventory: A Dataset of Global Glacier Outlines, Version 6[DB/OL]. Boulder, Colorado USA: National Snow and Ice Data Center, 2017.

[20] 牟建新, 李忠勤, 张慧, 等. 全球冰川面积现状及近期变化—基于2017年发布的第6版Randolph冰川编目[J]. 冰川冻土, 2018, 40(2): 238−248. [Mu Jianxin, Li Zhongqin, Zhang Hui, et al. The global glacierized area: Current situation and recent change, based on the Randolph Glacier Inventory(RGI 6.0) published in 2017[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2018, 40(2): 238−248.]

[21] Guo W Q, Liu S Y, Xu L, et al. The second Chinese glacier inventory: Data, methods and results[J]. Journal of Glaciology, 2015, 61(226): 357−372.

[22] Mölg N, Bolch T, Rastner P, et al. A consistent glacier inventory for Karakoram and Pamir derived from landsat data: Distribution of debris cover and mapping challenges[J]. Earth System Science Data, 2018, 10(4): 1807−1827.

[23] Uuemaa E, Ahi S, Montibeller B, et al. Vertical accuracy of freely available global digital elevation models (ASTER, AW3D30, MERIT, TanDEM-X, SRTM, and NASADEM)[J]. Remote Sensing, 2020, 12(21): 3482.

[24] 宿星, 魏万鸿, 郭万钦, 等. 基于SRTM DEM的地形起伏度对天水市黄土滑坡的影响分析[J]. 冰川冻土, 2017, 39(3): 616−622. [Su Xing, Wei Wanhong, Guo Wanqin, et al. Analyzing the impact of relief amplitude to loess landslides based on SRTM DEM in Tianshui Prefecture[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2017, 39(3): 616−622.]

[25] 喻红, 曾辉, 江子瀛. 快速城市化地区景观组分在地形梯度上的分布特征研究[J]. 地理科学, 2001, 21(1): 64−69. [Yu Hong, Zeng Hui, Jiang Ziying. Study on distribution characteristics of landscape elements along the terrain gradient[J]. Scientia Geographica Sinica, 2001, 21(1): 64−69.]

[26] Zhu M L, Yao T D, Yang W, et al. Differences in mass balance behavior for three glaciers from different climatic regions on the Tibetan Plateau[J]. Climate Dynamics, 2018, 50: 3457−3484.

[27] Huang L X, Chen J, Yang K, et al. The northern boundary of the Asian summer monsoon and division of westerlies and monsoon regimes over the Tibetan Plateau in present-day[J]. Science China (Earth Sciences), 2023, 66(4): 882−893.

[28] 杨勤业, 郑度. 冈底斯山−念青唐古拉山线自然地理意义的探讨[J]. 地理研究, 1985, 4(2): 36−44. [Yang Qinye, Zheng Du. On the significance of the boundary line-the Gandisi-Nyainqentanglha Range[J]. Geographical Research, 1985, 4(2): 36−44.]

Distribution pattern and causes of glaciers in the Tibetan Plateau based on terrain gradient

XU Ning[1], LI Zhiguo[1], LIANG Xueyue[2], ZHOU Xiaoying[1]

(1. Henan Engineering Technology Research Center of Ecological Protection and Management of the Old Course of Yellow River & Henan Green Technology Innovation Demonstration Base, Shangqiu Normal University, Shangqiu 476000, Henan, China; 2. The College of Geography and Environmental Science, Henan University, Kaifeng 475004, Henan, China)

Abstract: The formation and development of glaciers depend on a combination of topographic conditions and climatic factors, such as precipitation and temperature. However, the mechanisms underlying glacier distribution and variation remain uncertain. Our study aims to explore the relationship between glacier distribution patterns and topographical factors and uncover the driving forces behind them. To accomplish this, we utilized the Randolph Glacier Inventory version 6 and NASADEM for our analysis. Initially, we derived four key topographical factors based on NASADEM: relief degree of land surface (*RDLS*), altitude, slope, and aspect. Because the calculation of *RDLS* has scale dependence, the key is to determine the optimal analysis window using the average change-point analysis approach. The identified optimal analysis window size for *RDLS* evaluation in the study area was a rectangular neighborhood of 36 × 36 pixels, corresponding to an area of approximately 1.17 km^2. Subsequently, we examined glacier distribution patterns across various terrains in the Tibetan Plateau using the distribution index. This index elucidates the disparities between actual and standard glacier distributions across various mountain chains, excluding area disturbances. Finally, we employed the geodetector method to quantitatively assess the spatial interplay between glacier distribution patterns and topographical elements. This innovative statistical approach identifies spatially stratified heterogeneity, pinpoints explanatory factors, and evaluates interactive relationships between variables. The results show that: (1) Glacier distribution in the Tibetan Plateau shows strong selectivity for *RDLS* and altitude, with wide suitability for aspect and slope. The predominant distribution involves large *RDLS* and high altitudes. (2) Topography significantly influences glacier development, with varied effects of topographic factors on the spatial distribution of glaciers. Altitude and *RDLS* emerged as dominant factors controlling the distribution of glaciers, followed by slope and aspect. The interactive detection revealed that the combined effect of altitude and *RDLS* had a dominant impact on spatially stratified glacier heterogeneity. (3) Among altitude and *RDLS* gradients, the Himalayas Mountains had the most extensive glacier distribution, followed by the Karakoram Mountains. The other ten mountain ranges demonstrated diverse glacier distributions, though they mostly adhered to a normal pattern. This study will serve as a theoretical reference and provide data support for regional hydrology research. It offers vital guidance for appropriate water resource management in arid lands.

Keywords: glacier distribution; terrain gradient; distribution index; geodetector; Tibetan Plateau